

## El Proyecto REGENTE

**José Regidor Gutiérrez, Juan F. Prieto Morín, J.Manuel Sanz Megia, Rafael Quiros Donate, Antonio Barbadillo Fernández**

Instituto Geográfico Nacional. Servicio de Programas Geodésicos.

### **RESUMEN**

*Con el fin de establecer una cartografía europea unificada, se hace indispensable la conversión de las coordenadas de los Marcos de los Sistemas Geodésicos Nacionales al Marco ETRF89, lo cual sólo es posible a través de la determinación de transformaciones y superficies de ajuste desde uno a otro marco. Tal determinación requiere el conocimiento de ambas clases de coordenadas en un número muy elevado de estaciones uniformemente distribuidas, debiendo este número ser tanto mayor cuantas más irregularidades presente el Marco local.*

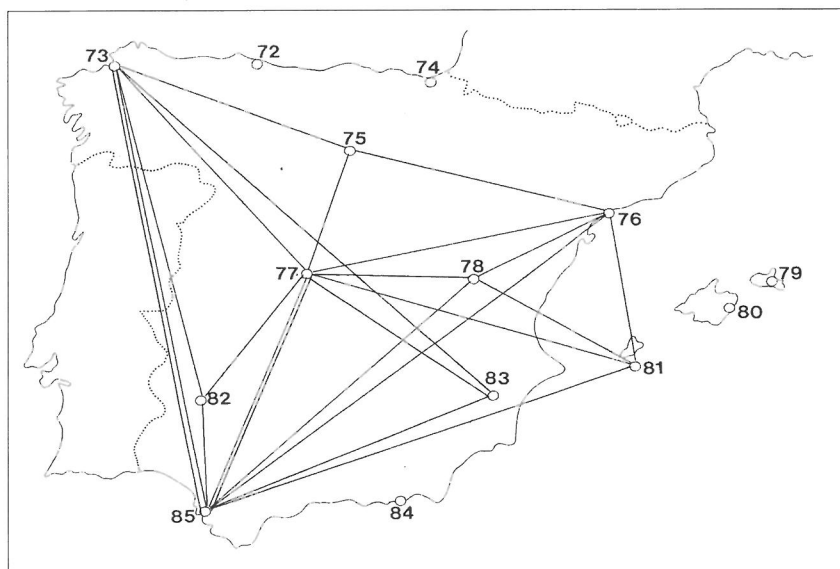
*En el caso de la Península y Archipiélagos, el IGN decidió resolver el problema mediante el Proyecto REGENTE (Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales), consistente en el establecimiento de una densa red GPS de alta precisión con estaciones coincidentes con vértices de ROI y con clavos de las líneas NAP. La densidad media quedó fijada en una estación por Hoja del MTN escala 1:50.000, es decir, de una estación por cada 300 km<sup>2</sup>. REGENTE quedará perfectamente enlazada con la red de referencia europea ETRF89 por medio de las redes ibéricas IBERIA95 y BALEAR98. REGENTE Canarias se apoya, como estación de referencia, en la estación GPS de Maspalomas, incluida en la red ITRF93.*

### **1.- ANTECEDENTES**

**1.1.- El proyecto EUREF89 y su marco.** Ante la gran diversidad de datums existentes en Europa y la consiguiente imposibilidad de unificar cualquier actuación de forma precisa sobre la cartografía continental y dada, por otro lado, la comprobada precisión y efectividad que la metodología GPS ofrecía a los geodestas, la primera actuación de la Subcomisión EUREF fue la planificación de una importante Campaña Europea GPS, conocida como EUREF89, donde participaron durante dos semanas 82 estaciones GPS, varias de ellas colocadas en las estaciones VLBI o SLR que se utilizaron como fiduciarias. España, a través del IGN, el SGE y el ROA, participó con 14 estaciones, entre ellas las fiduciarias Robledo (VLBI) y San Fernando (SLR).

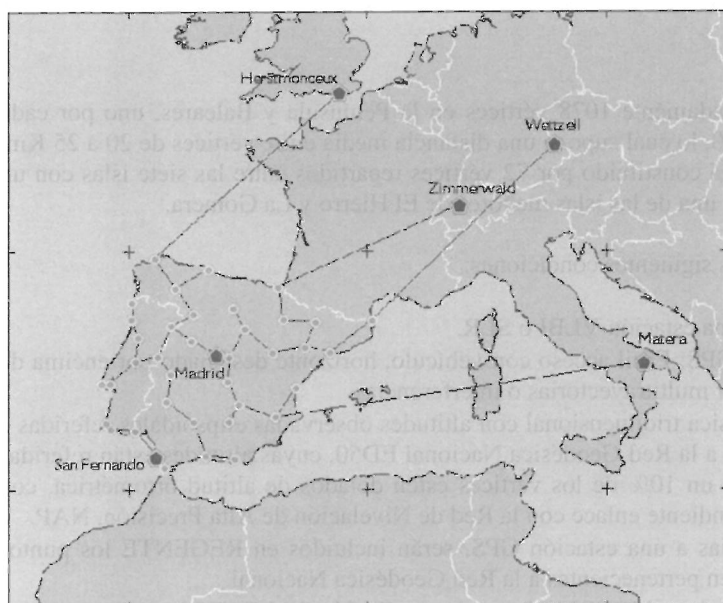
Tras la compensación en bloque de todas las observaciones, realizada manteniendo fijas las coordenadas de las estaciones SLR y VLBI del marco ITRF89 del International Earth Rotation Service, IERS, se obtuvo una red europea de alta precisión en GRS80, cuyas estaciones pasaron a formar parte del Marco Europeo EUREF89, en el que apoyar todos los posteriores trabajos de densificación GPS.

Los resultados finales obtenidos para EUREF89 se hicieron públicos en 1992, estableciéndose una serie de consideraciones sobre la precisión real de la red obtenida.



Además, la Subcomisión detectó pronto que, a escala global, EUREF89 no proporcionaba la precisión deseada para una red continental, consecuencia de la escasa constelación NAVSTAR existente en 1989, la mala configuración geométrica orbital y del ruido elevado de los receptores debido a la poca adecuada recepción de la frecuencia L2 en gran parte de los equipos GPS de cuadratura en aquel momento desarrollados y utilizados en la observación. Los resultados finales de EUREF89, por tanto, no pueden calificarse de excelentes, y las estaciones situadas al Oeste y Sudoeste de Europa, en especial las de Portugal y España, quedaron establecidas con un grado de precisión ligeramente inferior al del resto de la red. Por ello, recomendó la densificación del nuevo Sistema Geodésico de Referencia, ETRS89, mediante nuevas estaciones

**1.2. El proyecto IBERIA95.** Como resultado de algunos proyectos GPS de precisión efectuados en España, GEOBASE91, TANGO2, MAGIES93, EUROGAUGE93 y 94, se pudo constatar efectivamente que la exactitud de las coordenadas EUREF89 no era tan elevada como una moderna red geodésica requiere, por lo que, al igual que en otros países europeos y siguiendo las recomendaciones de EUREF, se pensó en el establecimiento de una Red Geodésica Tridimensional de alta precisión que cubriese todo el territorio peninsular, densificación del marco ETRF89, definido por las estaciones fiduciarias europeas.



El IGN y el Instituto Portugués de Cartografía e Cadastro, IPCC, planificaron el Proyecto IBERIA95, consistente en el establecimiento de una red compuesta por 27 estaciones españolas y 12 estaciones portuguesas, regularmente repartidas por la Península, donde, durante 5 días, con 12 horas diarias, se efectuaron observaciones simultáneas GPS, utilizando al efecto receptores de la última generación. En la red así formada, quedaron incluidas seis estaciones ITRF que actuaron como estaciones de referencia, sobre las que se apoyaron todos los cálculos. El cálculo fue realizado en el IGN utilizando el programa *Bernese GPS Software*, versión UNIX4.0, obteniéndose las coordenadas finales en el sistema de referencia ITRF96 para la época 1995.4 y también en el marco de referencia ETRF89.

Posteriormente, en el año 1998, se llevó a cabo el proyecto BALEAR98 como ampliación de la red IBERIA95 al archipiélago balear. Esta red está constituida por 6 estaciones distribuidas 2 en cada isla de Mallorca, Menorca y Pitiusas.

## 2. EL PROYECTO REGENTE.

Con el fin de establecer una cartografía europea unificada, se hace indispensable la conversión de las coordenadas de los Marcos de los Sistemas Geodésicos Nacionales al Marco ETRF89, lo cual es posible a través de la determinación de los siete parámetros de transformación (tres traslaciones, tres rotaciones y un factor de escala) desde uno a otro marco. Tal determinación requiere el conocimiento de ambas clases de coordenadas en un número muy elevado de estaciones uniformemente distribuidas, debiendo este número ser tanto mayor cuantas más irregularidades presente el Marco local.

En el caso de la Península y Archipiélagos, el IGN decidió resolver el problema mediante el Proyecto REGENTE (Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales), consistente en el establecimiento de una densa red GPS de alta precisión con estaciones coincidentes con vértices de ROI y con clavos de las líneas NAP. La densidad media quedó fijada en una estación por Hoja del MTN escala 1:50.000, es decir, de una estación por cada 300 km<sup>2</sup>.

REGENTE quedará perfectamente enlazada con la red de referencia europea ETRF89 al ser los puntos de la red IBERIA95 y BALEAR98 puntos de REGENTE. REGENTE Canarias, se apoya, como estación de referencia, en la estación VLBI de Maspalomas, incluida en la red ITRF.



## 2.1. Objetivos

La idea del proyecto REGENTE surge para alcanzar los siguientes objetivos:

- Materialización, observación y cálculo de coordenadas, para toda España, de una red geodésica básica tridimensional de Primer Orden, con precisión absoluta, fijada previamente para cada coordenada mejor o igual que 5 cm.
- Obtención de parámetros precisos de transformación entre el sistema de referencia de la Red Geodésica Nacional, ED50, y el de REGENTE, ETRF89.
- Facilitar datos válidos para la depuración del geoide español de precisión centimétrica. Se apoya el proyecto REGENTE con observaciones gravimétricas, por el método de relativas con gravímetros Lacoste-Romberg, en cada uno de sus puntos.
- Facilitar apoyo al elevado número de usuarios de la técnica GPS, de modo que un punto cualquiera del territorio nacional se encuentre dentro de un círculo de radio máximo de 15 Km. con centro en un vértice REGENTE.

## 2.2. Estructura

REGENTE quedará constituida por aproximadamente 1078 vértices en la Península y Baleares, uno por cada hoja del Mapa Topográfico Nacional, MTN, 1:50.000, lo cual supone una distancia media entre vértices de 20 a 25 Km. En Canarias, REGENTE Canarias, REGCAN95, está constituido por 72 vértices repartidos entre las siete islas con un máximo en Tenerife de 21 y un mínimo de 5 en cada una de las islas menores de El Hierro y La Gomera.

Los vértices de REGENTE han de cumplir las siguientes condiciones:

- Pertenecer a la Red Geodésica Nacional, o ser una estación VLBI o SLR.
- Reunir características comunes a una estación GPS: Fácil acceso con vehículo, horizonte despejado por encima de 10°, alejamiento de elementos que puedan causar multitrayectorias o interferencias.
- Dado que REGENTE constituye una red geodésica tridimensional con altitudes observadas elipsoidales referidas a GRS80 y que debe quedar perfectamente ligada a la Red Geodésica Nacional ED50, cuyas altitudes están referidas al nivel del mar, se ha establecido que más de un 10% de los vértices estén dotados de altitud ortométrica, con precisión subcentimétrica, a través del correspondiente enlace con la Red de Nivelación de Alta Precisión, NAP.
- Siempre que reúnan las características necesarias a una estación GPS, serán incluidos en REGENTE los puntos Laplace y las estaciones astronómicas de 2º orden pertenecientes a la Red Geodésica Nacional.
- Debido a que la red de apoyo para REGENTE es la red IBERIA95 con su ampliación BALEAR98, cada uno de los vértices de esta red pertenece a REGENTE.
- Servir de marco de referencia a redes locales utilizadas para controles geodinámicos o geofísicos en relación con movimientos relativos de fallas y placas tectónicas.

Del mismo modo, en REGENTE Canarias han sido incluidos los 12 vértices que integran la Red de Enlace de las Islas Canarias, observada inmediatamente antes que REGENTE, y cuyo punto fundamental es la Estación VLBI de Maspalomas, en Gran Canaria.

## 2.3. Reconocimiento y observación

El método utilizado en la observación de REGENTE es el estático, observándose simultáneamente bloques de 9 vértices, con 9 receptores de doble frecuencia con correlación cruzada de código P cuando éste está encriptado, constituyendo de esta manera polígonos adosados con 3 estaciones comunes, de manera que cada una de estas estaciones se observa en 2 bloques diferentes en distinta época.

Previamente se han seleccionado en gabinete los vértices que van a componer los bloques de REGENTE, atendiendo a los criterios anteriormente enunciados. Muy importante es la atención a la proximidad de al menos un vértice por bloque a una línea de Nivelación de Alta Precisión, NAP.

En un reconocimiento en campo se comprueba que los vértices cumplen las condiciones necesarias para una buena observación. Una vez seleccionado el vértice de manera definitiva, se procede a la instalación, en la cara superior del pilar de observación del vértice, de un dispositivo de centrado forzado estándar para la basada soporte de la antena



del receptor, de forma que se elimine prácticamente el error de estacionamiento de la antena en las sucesivas sesiones de observación, y, en su caso, en los diferentes bloques en que se ocupará el vértice en la misma o en futuras campañas.

La observación de cada bloque se realiza en dos sesiones diferentes, de tres horas de duración cada una, imponiendo que una de las dos sesiones sea matutina y la otra vespertina, para obtener, en cada una, geometría de constelación distintas que garanticen una repetibilidad de los datos. Una semana normal de cinco días incluye la observación de tres bloques completos, con un total de seis sesiones de observación. Al principio, al final y durante la sesión se toman datos de presión y temperatura, así como información sobre la constelación en vista e incidencias producidas con el fin de ayudar en el cálculo posterior. La programación de las observaciones se introduce semanalmente en los receptores, y, también semanalmente, se recogen los datos observados para su preanálisis y la documentación aneja a la observación.

En cada bloque, al menos un vértice está unido a la red de Nivelación de Alta Precisión mediante observación en dos clavos NAP, o clavos auxiliares unidos a éstos con un ramal de nivelación de alta precisión si no son estacionables los NAP. La distancia entre los dos clavos y el vértice no debe ser mayor de cuatro kilómetros. Esta observación de nivelación se efectúa simultáneamente con la observación de cada bloque, colocándose dos receptores monofrecuencia en cada una de las señales NAP o auxiliares.

Con todo ello se persiguen dos objetivos fundamentales:

- Disponer de una red de puntos que tienen precisión centimétrica en sus coordenadas geodésicas
- Disponer de altitud ortométrica suministrada por la red NAP, como una herramienta muy eficaz para el control de un geoide gravimétrico de precisión, o realizado por cualquier otra técnica.

Se podrá dotar a toda la red REGENTE, por medio de los apropiados algoritmos de interpolación, de valores ortométricos con precisión subdecimétrica y en conjunción con un geoide gravimétrico, dar altitudes ortométricas a cualquier punto.

## 2.4. Cálculo y ajuste

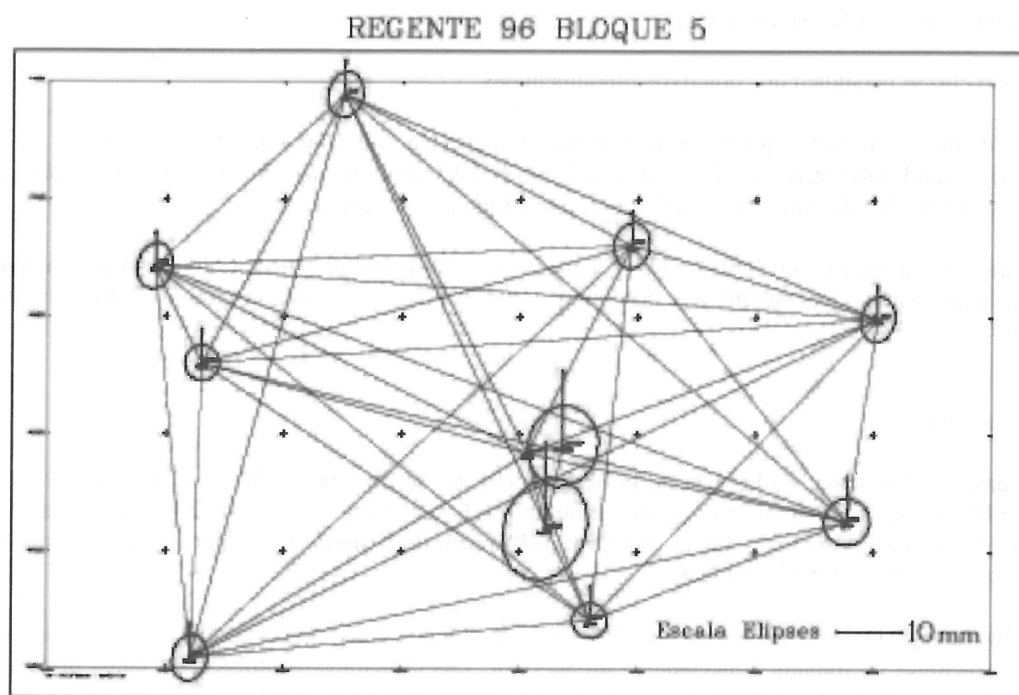
Hasta pasadas dos semanas después de la observación, no se dispone de la solución definitiva combinada de Efemérides de Precisión, y durante este intervalo de tiempo se hace un análisis previo de la calidad de la observación. El cálculo de los vectores se realiza con el programa *GPSurvey de Trimble* utilizando las Efemérides de Precisión obtenidas como solución combinada del IGS.

Se definen proyectos de cálculo coincidentes con cada bloque de campo observado. Estos proyectos se calculan en diferentes estaciones de trabajo, conectadas a un servidor. Las estaciones adquieren los datos brutos del servidor, generan los respectivos proyectos y devuelven los resultados a la red. El resultado final que cada estación deja en la red es un archivo backup completo de todo el proyecto así como dos archivos sumario, uno de los cuales recoge todo el informe del cálculo, y el otro todos los archivos generados, uno por cada vector calculado, en que aparece el nombre del archivo, las estaciones enlazadas, la distancia geométrica, parámetros estadísticos de precisión y las alturas de antena. Este último sumario es el que se utiliza para seleccionar los vectores que entrarán en la posterior fase de compensación. Por último se genera un archivo en el que se encuentran compactados todos los archivos de los vectores dispuestos para compensación.

El proceso de compensación, utilizando el programa *GeoLab de Geosurv Inc.*, comienza con una compensación previa por bloques como red libre, sin ningún tipo de constreñimientos. En ella se analizan la concordancia de las soluciones aportadas por las distintas sesiones y el cierre de los vectores, y finalmente, se les asigna su ponderación correspondiente. Como ejemplo se incluyen los resultados del ajuste libre del cálculo del bloque 5 de la campaña REGENTE96. En él se puede comprobar como las elipses de error, con un 95% de grado de confianza, están dentro de un orden de 4 mm. en planimetría y 6 mm. en altimetría para los vértices observados con aparatos de doble frecuencia. Se aprecia también como en los dos clavos de nivelación las elipses son mayores, al haberse observado con aparatos de una sola frecuencia.



=====				
		REG96B05		
GeoLab V2.4d	WGS 84		UNITS: m,GRAD	Page 0024
=====				
2-D and 1-D Station Confidence Regions (95.000 percent):				
STATION	MAJOR SEMI-AXIS	AZ	MINOR SEMI-AXIS	VERTICAL
-----				
18191	0.004	12	0.003	0.006
21432	0.004	12	0.003	0.006
21584	0.004	11	0.003	0.006
21661	0.004	11	0.003	0.006
25258	0.003	12	0.003	0.006
25451	0.004	6	0.004	0.008
29054	0.004	12	0.003	0.006
29177	0.003	13	0.003	0.006
NAPF625D	0.007	12	0.006	0.013
NAPF631	0.009	22	0.007	0.015



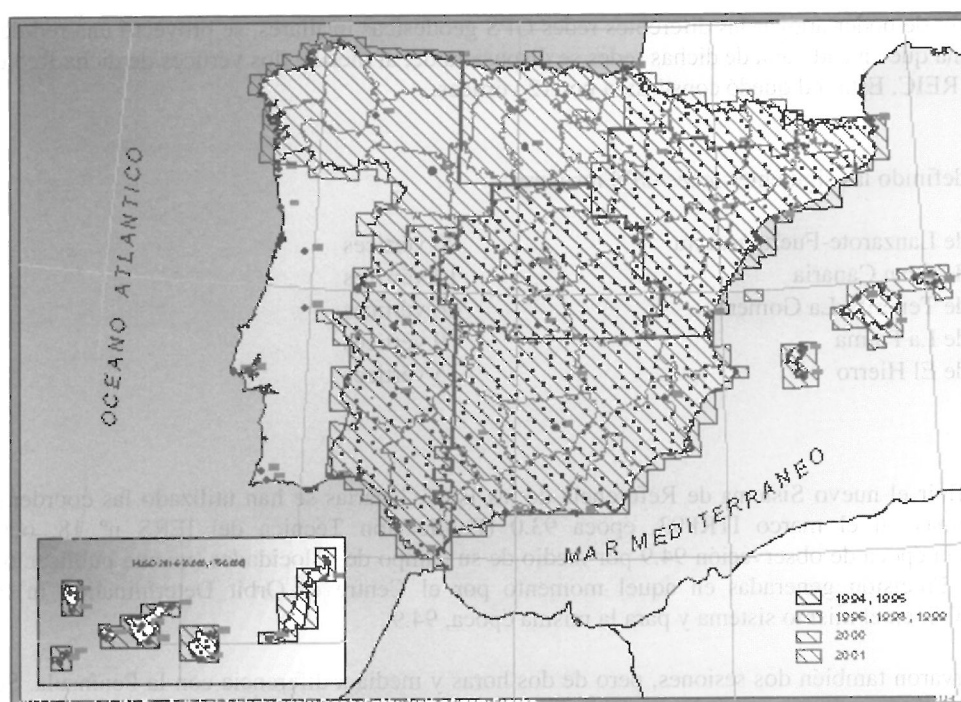
Una vez depurada la observación en red libre, se procede al ajuste conjunto de todos los bloques que componen una campaña, manteniendo fijas las coordenadas de los vértices de IBERIA95 y de los vértices ya calculados en campañas anteriores. Al finalizar el proceso, se guardan en base de datos las componentes de los vectores con su matriz de varianza-covarianza, el peso que se les ha asignado y las coordenadas calculadas. Asimismo se actualizan en la base de datos aquellos que figuran en la reseña de cada vértice.

De esta manera el usuario puede disponer ya de unas coordenadas, aunque no definitivas, suficientemente precisas hasta la finalización del proyecto, momento en el que se procederá a una compensación definitiva de toda la red.

## 2.5. Desarrollo

Los trabajos de campo de REGENTE, que comenzaron en el año 1994, debían, en principio, finalizar en 1997. Por ello se dividió el conjunto del proyecto en cuatro campañas anuales, aproximadamente iguales cada una en número de vértices y valoración económica.





Como puede apreciarse en la figura, la campaña de 1994 abarcó lo que se denomina REGENTE Centro, y comprende toda la zona central, 143 hojas, y REGENTE Canarias que comprende todas las Islas Canarias, 92 estaciones, 66 principales y 26 auxiliares, lo que permitió augurar una finalización del Proyecto en un plazo de unos 5 años. Pero ya en 1995, los presupuestos se recortaron de forma importante, por lo que la observación se redujo a 159 hojas con un total de 182 estaciones GPS. En 1996, la reducción presupuestaria fue más drástica, limitándose la observación a 65 nuevas hojas con un total de 88 estaciones GPS, 16 de ellas en Francia para enlace con la Réseau Géodésique Français, RGF, equivalente francés de REGENTE. En 1997, el recorte económico fue total, por lo que no se llevó a cabo observación alguna de REGENTE.

En el año 1998 se volvió a retomar el proyecto, observándose 218 hojas con 234 estaciones GPS en la Península y las Islas Baleares con 15 vértices observados. El año 1999, se observaron 218 hojas con 203 estaciones GPS. En el presente año, se ha llevado a cabo la observación de 171 hojas con un total de 209 estaciones GPS.

Visto el desarrollo de los trabajos, se puede vaticinar para el próximo 2001 la conclusión de esta red tan importante para los futuros proyectos de cartografía nacional. Téngase en cuenta que la cartografía de la OACI para navegación aérea debía haber estado disponible en SGR80 antes de final de siglo, y el propio Grupo de Trabajo VIII de CERCO ha recomendado que las cartografías oficiales de los países miembros estén referidas a ETRF89 en un plazo de 10 años, con objeto de que toda la cartografía europea quede unificada, bajo la responsabilidad de MEGRIN. Por otro lado, otros organismos demandan la definición de un sistema de este tipo, como pueden ser la Red de Señales Marítimas en navegación, las radiobalizas y demás elementos de navegación aérea, la georeferenciación de concesiones mineras, etc., debido precisamente al uso de sistemas que operan asistidos mediante GPS.

La conclusión de REGENTE influye de forma muy importante en dos trabajos de gran interés:

- La determinación precisa de un escalado del geoide gravimétrico peninsular (M. Sevilla et al.)
- La determinación de los parámetros de transformación y superficies de interpolación entre los marcos ETRF89 y ROI ED50 más adecuados para diversas zonas de la Península e Islas Baleares.

## 2.6. Regente Canarias

Las observaciones REGENTE Canarias han servido como base fundamental para el establecimiento de la nueva Red Geodésica Canaria, datum REGCAN95, sustitutoria de la anterior definida en el datum PICO DE LAS NIEVES. En el caso de Canarias, la densidad de vértices REGENTE es superior a la de la Península, obteniéndose en el caso más desfavorable, Islas de Gran Canaria y Fuerteventura, una distancia media entre puntos de trece kilómetros.



Con el fin de poder apoyar las diferentes redes GPS geodésicas insulares, se proyectó una red de unión de todas las islas de forma que en cada una de dichas redes se dispusiera de, al menos, dos vértices de dicha Red de Enlace de las Islas Canarias, REIC. Esta red quedó constituida por 12 vértices.

Se han definido las siguientes redes GPS insulares:

- |                                      |             |
|--------------------------------------|-------------|
| • Red GPS de Lanzarote-Fuerteventura | 20 vértices |
| • Red GPS de Gran Canaria            | 12 vértices |
| • Red GPS de Tenerife-La Gomera      | 26 vértices |
| • Red GPS de La Palma                | 9 vértices  |
| • Red GPS de El Hierro               | 5 vértices  |

Para definir el nuevo Sistema de Referencia de las Islas Canarias se han utilizado las coordenadas del vértice INTA-Maspalomas en el marco ITRF93, época 93.0 (Publicación Técnica del IERS nº 18, oct. 94, tabla 5), transportadas a la época de observación 94.9 por medio de su campo de velocidades (misma publicación, tabla 6) y las Efemérides de Precisión generadas en aquel momento por el Centre of Orbit Determination in Europe, CODE, integrante del IGS, en el mismo sistema y para la misma época, 94.9.

Se observaron también dos sesiones, pero de dos horas y media a diferencia con la Península. Se consideró que esta reducción de tiempo no afectaría a la precisión final de la red, dada la menor distancia entre vértices comparada con la red peninsular. En todo lo demás el sistema de observación se desarrolló de igual manera que se efectúa en la Península.

En cuanto al apoyo de nivelación, hay que decir que en el momento de la observación (año 1994) de todo el archipiélago, solo en Tenerife existía un anillo de NAP que rodea la isla por la costa. En esta isla, quedaron incorporados en REGENTE cuatro vértices que están incluidos en ese anillo y disponen de clavo NAP. En el resto de las islas, fueron dejados clavos que actuaron como puntos de apoyo para nivelación y que están siendo nivelados en las campañas que se están llevando a cabo. Esta nivelación tuvo una primera fase en septiembre de 1997 con la nivelación de las islas orientales, estando prevista la segunda fase final en el presente año, y comprende, además de la nivelación de los anillos con niveles e instrumental de precisión, la determinación de la gravedad en todos los clavos así como la determinación de su posicionamiento, a través de GPS, de cada uno de ellos.

Las diferentes redes GPS insulares fueron compensadas fijando los correspondientes vértices de REIC. Cada una de estas redes sirvió para ajustar de nuevo las observaciones clásicas de la ROI en cada una de las islas. Apoyadas en las estaciones REGENTE Canarias, se compensaron las observaciones convencionales de un total de 204 vértices, quedando establecido el marco ROI REGCAN95, base de toda la nueva cartografía que se está formando actualmente en el Archipiélago.